

现代引信技术丛书



High Dynamic Microsystems and MEMS Fuze Technology

高动态微系统与MEMS 引信技术(下)

娄文忠 冯跃 牛兰杰 王亚斌 李建华 严楠 © 等编著

● 剖析前沿微系统技术

● 构建智能集成新理论

● 形成动态微系统体系

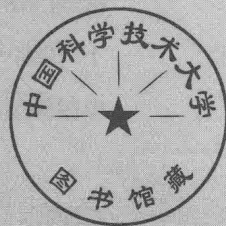
● 创新微引信新型应用



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高动态微系统与 MEMS 引信技术（下）

娄文忠 冯跃 牛兰杰 王亚斌 李建华 严楠 等编著



国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书分上、下两册：上册重点介绍微系统技术基础、互连技术、封装集成技术等，以高动态微系统技术及其典型应用为主线，构建高动态微系统的理论体系，研究其设计方法和规律，介绍典型高动态微系统的主要工艺、检测及集成应用方法；下册以典型高动态微系统——MEMS 引信——为例，重点介绍 MEMS 引信总体技术、MEMS 安全系统、含能微器件及其系统、引信射频 MEMS 技术、引信用微惯性器件、引信专用芯片、MEMS 引信用固态控制器相关知识，针对高动态微系统的发展趋势列举了大量具体研究成果并进行相应的理论分析，为高动态微系统的论证分析、设计、加工及应用提供参考。

本书主要以高动态微系统的基础知识及应用方法为主，可作为高等学校信息类、控制类、新材料及能源类相关专业，特别是智能系统、武器系统、微纳工程、物联网、航空与航天技术等军民融合相关专业的参考书，也可供从事智能系统、光电系统、导航与控制系统、引信与弹药领域的技术人员和管理人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高动态微系统与 MEMS 引信技术：全 2 册/娄文忠等编著. —北京：国防工业出版社，2016.4

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10831-6

I. ①高… II. ①娄… III. ①微电子技术—引信 IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 116988 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17¼ 字数 363 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 219 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 88540777

发行邮购：(010) 88540776

发行传真：(010) 88540755

发行业务：(010) 88540717

《现代引信技术丛书》

编委会

名誉主任 马宝华

执行主任 范宁军 娄文忠

编委会委员 (按姓氏拼音排序)

陈慧敏 邓宏彬 冯 跃 何光林 李世中

李晓峰 牛兰杰 申 强 宋荣昌 隋 丽

王军波 吴炎烜 熊永家 杨 喆 张 亚

丛书策划 王京涛

秘 书 吴炎烜 冯 晨

审委会

主 任 朵英贤

副 主 任 黄 峥 秦光泉 谭惠民 游 宁

审委会委员 (按姓氏拼音排序)

蔡瑞娇 陈科山 崔占忠 冯顺山 傅调平

高春清 韩子鹏 胡景林 李长福 李世义

刘明杰 刘小虎 牛少华 齐杏林 施坤林

石 坚 石庚辰 宋道志 徐立文 徐立新

伊福廷 袁 正 张菁华 邹金龙

引信是利用目标、环境或指令信息，在预定的条件下解除保险，并在有利的时机或位置上起爆或引燃弹药战斗部装药的控制系统（或装置）。弹药是武器系统的核心部分，是完成既定战斗任务的最终手段。引信作为弹药战斗部对目标产生毁伤作用或终点效应的控制系统（或装置），始终处于武器弹药战场终端对抗的最前沿。大量实战案例表明：性能完善、质量可靠的引信能保证弹药战斗部对目标实施有效毁伤，发挥武器弹药作战效能“倍增器”的作用；性能不完善的引信则会导致弹药在勤务处理时、发射过程中或发射平台附近过早炸，遇到目标时发生早炸、迟炸或瞎火，不仅贻误战机，还可能对己方和友邻造成严重危害。

从严格的学科分类意义上讲，“引信技术”并不是一个具有相对独立的知识体系的学科或专业，而是一个跨学科、专业的工程应用综合技术领域。因此，现代引信及其系统是一类涉及多学科、专业知识的军事工程科技产品。纵观历史，为了获取战争对抗中的优势，人们总是将自己的智慧和最新科技成果优先应用于武器装备的研制和发展。引信也不例外，现代引信技术的发展一方面受到武器弹药战场对抗的需求牵引，另一方面受到当代科学技术进步的发展推动。

近 30 年来，随着人类社会进入以信息科技为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆—制导一体化、微小型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“现代引信技术丛书”共 12 册，较系统和客观地反映了近 30 年来现代引信技术部分领域的理论研究和技術发展的现状、水平及趋势。丛书包括：《激光引信技术》《中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术》《引信安全系统分析与设计》《引信环境及其应用》《引信可靠性技术》《高动态微系统与 MEMS 引信技术》《现代引信装配工程》《引信弹道修正技术》《高价值弹药引信小子样可靠性评估与验收》《弹目姿轨复合交会精准起爆控制》《侵彻弹药引信技

术》《引信 MEMS 微弹性元件设计基础》。

这套丛书是以北京理工大学教师为主，联合中北大学及相关科研单位的教师 and 研究人员集体撰写的。这套丛书的特色可以概括为：内容厚今薄古；取材内外兼收；突出设计思想；强调普适方法；注重科技创新；适应发展需求。这套丛书已列为 2015 年度国家出版基金项目，既可作为从事兵器科学与技术，特别是从事弹药工程和引信技术的科技工程专业人员和管理人员的使用工具，也可作为高等学校相关学科专业师生的教学参考。

这套丛书的出版，对进一步推动我国现代引信技术的发展，进而促进武器弹药技术的进步具有重要意义。值此丛书付梓之际，衷心祝贺“现代引信技术丛书”的出版面世。



2016 年 1 月

新技术不仅推动现代工业的变革，还能在财富创造中起重要作用，以智能手机、物联网、汽车、大数据和智能制造为代表的新技术集成了多学科先进技术和革新，以微电子和微系统技术为基础的信息系统是驱动新型工业技术前进的引擎，推动许多传统产业（如钢铁、汽车、火车和纺织等）的生产过程更加自动化和智能化，信息系统的集成度越来越高，体积越来越小，速度越来越快，功能越来越强大，技术和成本优势已在智能系统上得以实现，借助微系统技术正促进类似概念在机械系统中实现。微系统技术是以微电子技术、微光电技术和微机电系统技术为基础，通过系统构架和算法技术，由微传感器、微机构或微执行器、微控制器、各种接口以及微能源等构成的一体化软、硬件多功能集成系统。微系统借助微/纳米级三维结构和设备，集传感、计算、能源和驱动控制为一体，彻底改变了电子智能和感官世界之间的联系。本书从历史发展的视角论述以微系统为代表的新兴技术给 21 世纪带来的巨大影响。高动态微系统是微系统在复杂、高过载环境下的特殊应用，具有成本低、体积小、质量小、可靠性高、可集成等特点，能够实现复杂的系统功能，适于批量生产。美国正在积极拓展高动态微系统技术前沿，发起新一轮军事革新，在美国国防先进技术研究项目局（DARPA）专门成立的微系统技术办公室（MTO）最新计划中，将典型高动态微系统——MEMS 引信列为四项前沿技术的首项，以达到降低引信成本以及体积的目标。

摩尔定律技术路线竞争残酷，投资量级是 10 亿美元，产品只有计算和存储芯片。微系统技术是基于超越摩尔（More than Moore）定律，在半导体技术的基础上，在成熟的工艺生产线上研发非数字、多元化微加工技术与产品，系统级构建信息链、信号处理和算法设计等。

本书介绍微系统技术在航空航天与军事领域、物联网领域、机器人领域、可穿戴设备领域、智能制造领域等的实际应用，研究高动态微系统的内涵和设计规律，特别是典型高动态微系统——MEMS 引信在需求配置、设计规律、工艺与制造方法、检测与集成技术等方面的应用规律及案例。

编写这上、下两册书的目的是既保证技术体系完整，又要适应当今技术变革和科技创新的迫切需求。本书内容注重实际应用，可为相关知识领域的本科

生、研究生、工程师和科技专家提供技术参考。

编写本书的目的是在微纳米技术与智能弹药及引信技术间搭建桥梁,促进高新技术在特种装备领域应用与推广。随着纳米技术、可延展电子技术、石墨烯技术、碳纳米管技术、柔性电子技术不断涌现,新工艺与新方法不断应用,已初步形成了高动态微系统的技术体系。

北京理工大学娄文忠教授负责第1章、第3章和第4章的编写,中国兵器工业集团第二一二研究所牛兰杰研究员和北京理工大学冯跃博士负责第2章的编写,北京理工大学王亚斌副教授和王大奎博士负责第5章的编写,冯跃博士和王辅辅博士负责第6章、第9章的编写,冯跃博士还编写了第7章,北京理工大学严楠教授及所在学科组的朱艳丽老师、鲍丙亮博士、南京理工大学朱朋博士负责第10章的编写,北京理工大学机电学院李建华博士负责第11章、第12章部分内容的编写,北京大学微纳电子研究院张威博士、苏卫国博士负责第12章部分内容的编写,北京理工大学娄文忠教授和航天科工集团第二十五研究所赵越博士、博士研究生刘鹏、王辅辅、丁旭冉负责第8章、第13章、第14章的编写。北京理工大学智能微系统研究室的宋荣昌博士、李建华博士、冯跃博士及赵越博士,博士研究生刘鹏、王辅辅、丁旭冉、王大奎,硕士研究生王真、郭云龙、刘传钦、顾新伟、刘芳怡、王瑛、吕永佳等的研究成果对本书编写提供了很大帮助,娄文忠、冯跃分别对全书进行了审核,博士生刘鹏和王辅辅对全书进行了编排和整理。

中国兵器工业集团第二一〇研究所郭美芳研究员、柏席峰高级工程师,中国科学院半导体研究所杨晋玲研究员,中国兵器工业集团第二一二研究所马岸英研究员、孙发鱼研究员,重庆长安工业(集团)有限责任公司秦光泉研究员、黄江研究员、张明荣高级工程师、徐承刚高级工程师,国营第三〇四厂潘海研究员等为本书提供了大量宝贵的资料。

本书的出版得到国防工业出版社、北京理工大学、北京大学、南京理工大学、中国兵器工业集团第二一二研究所、中国兵器工业集团第二一三研究所、国营第三〇四厂、重庆长安工业(集团)有限责任公司、中国科学院半导体所、中国科学院微电子所等单位的大力支持。

中国兵器工业集团第二一二研究所牛兰杰研究员、邹金龙研究员,原总装备部炮兵防空兵装备技术研究所王军波高级工程师,北京理工大学徐立新教授、牛少华博士,华中科技大学刘小虎教授等在百忙之中为本书审稿,在此感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2015年10月

第8章 MEMS 引信总体技术	1
8.1 现代引信本质与内涵	1
8.2 微系统技术在引信中的应用	2
8.3 国外 MEMS 引信现状	5
8.3.1 典型的 MEMS 引信器件	7
8.3.2 典型的 MEMS 引信组件	24
8.3.3 MEMS 引信系统级集成	26
8.4 集成化 MEMS 引信技术——片上引信	30
8.4.1 片上引信——MEMS 引信发展方向	30
8.4.2 片上引信的技术优势	32
8.4.3 片上引信集成化方法	35
8.4.4 片上引信加工、集成与检测技术	41
8.5 小结	46
参考文献	46
第9章 MEMS 安全系统结构、作用及设计方法	49
9.1 MEMS 安全系统的优势	49
9.1.1 可靠性大幅提升	49
9.1.2 抗高过载性能显著提高	51
9.1.3 新材料的引入带来性能提升	56
9.2 国外典型 MEMS 安全系统介绍	59
9.3 典型 MEMS 安全系统设计方法	65
9.3.1 镍基典型 MEMS 安全系统的设计方法	65
9.3.2 基于混合工艺典型超精细加工安全系统的设计方法	68
9.3.3 硅基 MEMS 安全系统的设计方法	75
9.4 MEMS 安全系统发展趋势及未来	79
参考文献	80

第 10 章 含能微器件及其系统	83
10.1 基本概念、常用术语及分类	83
10.1.1 基本概念	83
10.1.2 常用术语	84
10.1.3 分类	85
10.2 应用背景及设计特点	85
10.2.1 常用含能材料及能量特性	85
10.2.2 微型换能元	87
10.2.3 微型推冲器	107
10.2.4 微型雷管或微型起爆器	109
10.2.5 微型传爆序列	112
10.2.6 微型含能执行机构	116
参考文献	123
第 11 章 引信 RF MEMS 技术	125
11.1 概述	125
11.1.1 典型 RF MEMS 器件及技术现状	125
11.1.2 无线电引信用 RF MEMS 技术	133
11.2 典型 MEMS 微电感——悬浮螺旋电感器	137
11.2.1 等截面式悬浮螺旋电感器	138
11.2.2 阶梯式悬浮螺旋电感器	145
11.3 高性能射频 MEMS 振荡器	151
11.3.1 基本技术	151
11.3.2 技术指标	152
11.3.3 典型应用	153
参考文献	156
第 12 章 智能弹药及引信用微惯性器件	158
12.1 概述	158
12.2 MEMS 加速度计与惯性开关技术	162
12.2.1 MEMS 加速度计与惯性开关的工作原理	162
12.2.2 典型引信用 MEMS 加速度计与惯性开关的设计	167
12.2.3 典型 MEMS 加速度计与惯性开关的制作技术	171
12.2.4 典型 MEMS 加速度计与惯性开关的测试	176
12.2.5 MEMS 加速度计与惯性开关的性能指标	178

12.3	MEMS 微陀螺技术	180
12.3.1	MEMS 微陀螺的原理	180
12.3.2	典型 MEMS 微陀螺的设计	183
12.3.3	典型 MEMS 微陀螺的加工	185
12.3.4	典型 MEMS 陀螺的性能指标	188
12.4	小结	191
	参考文献	191
第13章	引信专用芯片	193
13.1	概述	193
13.1.1	特点和意义	193
13.1.2	发展历史和现状	195
13.1.3	未来发展趋势	197
13.2	引信计时专用芯片	200
13.2.1	引信计时专用芯片原理	200
13.2.2	信号处理与引信计时	201
13.3	引信计时专用芯片的设计	202
13.3.1	引信专用芯片设计与验证平台	202
13.3.2	引信计时专用芯片总体架构	203
13.3.3	定时信息数据格式	207
13.3.4	引信计时专用芯片数字电路模块设计	209
13.3.5	引信计时专用芯片模拟电路模块设计	214
13.3.6	代码综合	217
13.4	引信计时专用芯片的仿真与测试	218
13.4.1	引信计时专用芯片仿真	218
13.4.2	引信专用芯片硬件仿真	220
13.4.3	引信专用芯片工艺	220
13.4.4	引信计时芯片测试	223
13.5	小结	223
	参考文献	223
第14章	MEMS 引信用固态控制器	227
14.1	MEMS 固态开关组芯片	227
14.1.1	MEMS 固态开关组概述	227
14.1.2	MEMS 固态开关组设计与理论计算	229

14.1.3	MEMS 固态开关组模拟与分析	236
14.1.4	MEMS 固态开关组的加工工艺	245
14.1.5	固态开关组功能性测试方法	248
14.2	MEMS 固态自毁、自失能和自失效控制芯片	254
14.2.1	MEMS 固态自毁、自失能和自失效控制芯片功能设计 ...	255
14.2.2	MEMS 固态自毁、自失能和自失效控制芯片加工	257
14.2.3	MEMS 固态自毁、自失能和自失效控制芯片测试及结果 ...	258
14.3	MEMS 固态非可逆多逻辑门芯片	259
14.3.1	MEMS 固态非可逆多逻辑门芯片设计	260
14.3.2	MEMS 固态非可逆多逻辑门芯片加工	261
14.3.3	MEMS 固态非可逆多逻辑门芯片可靠性测试	263
14.4	MEMS 引信用固态控制器封装	265
14.5	小结	268
	参考文献	269

第 8 章

MEMS 引信总体技术

21 世纪兵器快速进入智能化、信息化和微型化阶段，因此现代武器装备采用 MEMS 技术是世界武器发展的必然趋势。引信技术不但具有目标及干扰的识别能力、目标定位和起爆控制能力、安全控制能力，而且具有与火控系统、制导系统、导航平台以及其他引信的信息交联能力，引信技术在武器系统中所起的作用越来越突出。同时，现代高新技术武器装备的不断发展，带来了作战模式的创新变化，武器系统要求引信具有精确打击、高效毁伤及低附带损伤等军事能力。这些都需要对现代引信总体技术进行更深入透彻的研究。

8.1 现代引信本质与内涵

“引信是利用目标信息和环境信息，在预定条件下引爆或引燃战斗部装药的控制装置或系统。”首先，引信是弹药安全保证与可靠起爆控制的装置（系统）；其次，引信是复杂环境下典型的高动态微系统。其基本功能是：保证引信从出厂到飞临目标前在各种自然与力学环境中不引爆弹药；满足引战配合要求，在预期的时间、位置或方向上起爆；输出能量足以使战斗部完全爆炸。就引信技术而论，它是集机械、电子、声、磁、化学、计算机及其复合技术为一体的高技术研究领域。

在新技术以及新的作战需求的催生下，引信不但应提高目标、背景和干扰的识别能力，提高目标定位与起爆控制能力，提高安全控制能力，更应具有与外界通信的能力。引信不但要与火控系统、制导系统、导航平台、侦查监视平台的信息交联，还要与其他引信实现信息交联，实现引信组网。同时，引信灵巧化的需求也越来越凸显，对于硬目标侵彻弹药，触发引信的功能发展经历了瞬发、固定延期、随机起爆、穿透起爆、计层次起爆、计行程起爆和计深度起爆，其中，穿透起爆、计层次起爆、计行程起爆和计深度起爆有很强的自适性（或称智能化）能力，硬目标侵彻引信可以通过编程选择其中任一作用方式。

引信功能拓展的同时,受弹药外形及引信与战斗部接口尺寸的限制,引信外形难以有较大改变,为容纳更多的功能模块需要压缩引信安全系统与起爆控制系统的体积,但传统技术已难以满足引信核心模块体积减小的需求,需将新技术用于引信微型化、小型化,如图8-1所示。

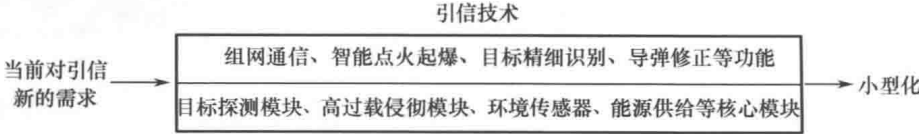


图 8-1 当前引信需求带来的引信技术变革

8.2 微系统技术在引信中的应用

由于微系统具备集成化程度高的特点,与引信小型化和智能化的时代需求十分吻合。微系统与智能信息处理技术、多传感器信息融合技术的结合,为提高引信性能,使其进一步智能化开辟了新的技术途径。

传统引信包括发火控制系统、安全系统、爆炸序列、能源系统和辅助构件五部分,如图8-2所示。

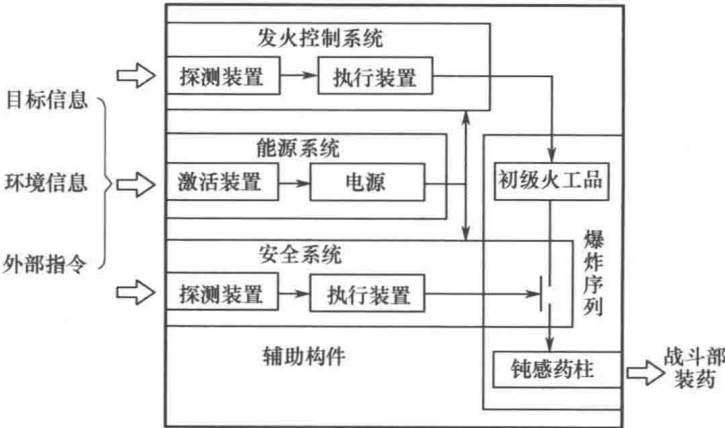


图 8-2 引信结构

发火控制系统由探测装置和执行装置构成。首先接收来自目标或来自发射环境的信息;然后进行信号处理,感知发射、接近或触及目标,判断起爆时机;最终引爆爆炸元件。安全系统包括探测装置和执行装置。一般接收来自环境的信息;经过信息处理器确认已进入外弹道环境,启动定时器或直接启动执行器,为隔爆机构或击发机构解除保险。爆炸序列由火帽、雷管等初级火工品以及导爆管、传爆管等钝感药柱构成。由第一级发火,逐级传导,能量递增、

感度递减,最后传爆管可靠引爆战斗部。能源系统包括电源以及激活装置。电源包括逆变、变压、整流、滤波、稳压等电路或装置。此外,引信还常利用弹道上的环境能源,如后坐、旋转、碰撞、迎面气流、气动热等。辅助构件包括引信体等连接、密封零部件。

美国 DARPA 将 MEMS 技术在引信中的应用排在第一位,以下统称为 MEMS 引信技术,如图 8-3 所示,利用 MEMS 安全系统来取代传统机械式安全系统,体积减小 38%,质量减小 53%。

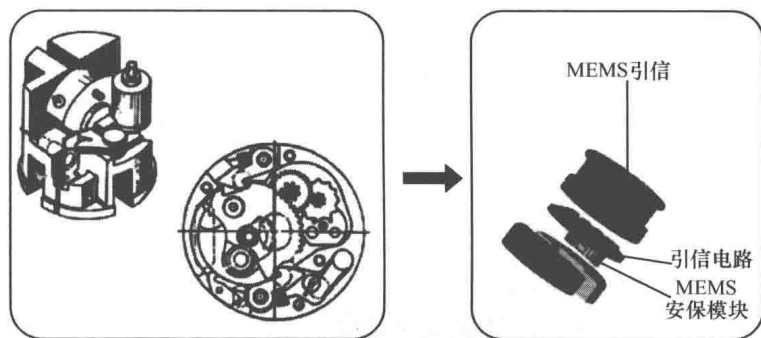


图 8-3 安全系统的小型化

德国 JUNGHANS Microtec 公司的 Max Perrin 在 2011 年美国引信年会 *Correcfion Fuze—Integration Technologies* 文章中提出传统引信与 MEMS 引信之间组成部分的联系和区别,以及 MEMS 引信中涉及的关键技术。

图 8-4 示出了传统引信到 MEMS 引信的模块的变化,以及 MEMS 引信各个模块涉及的关键技术。从图 8-4 可以看出,对于发火控制系统, MEMS 引信正朝传感器微型化和电子一体化方向发展,比如:微型红外传感器、射频传感器以及光传感器等可用来感知目标信息;力、温度、声/磁传感器等可用来感知环境信息;GPS 等传感器可用来获取外部定位指令。不同于常规的传感器,在 MEMS 引信中应用传感器需要耐高过载、高冲击。如确定钻地弹地下炸点位置的高阈值加速度传感器,需要分辨的阈值范围为 $(0.2 \sim 2) \times 10^5 g$ 。对于安全系统,利用 DRIE 技术加工的硅基一体化安全系统,以及利用 LIGA 工艺(或 UV-LIGA 工艺)加工并且借助微装配系统进行装配是安全系统小型化最有前途的两种实现手段。爆炸序列则主要在亚毫克装药、装药的配方以及传爆方式(飞片)等方面的探索。

对比传统引信, MEMS 引信具有以下优点:

(1) 体积小、质量小。典型炮弹引信(M739 引信)体积为 197cm^3 时,质量为 647.7g ,如采用 MEMS 引信,其体积和质量将会比现有引信减小一两个数量级。由于导弹引信的体积和质量通常比炮弹引信大一两个数量级,所以

导弹采用 MEMS 引信可极大地减小导弹体积和质量,从而大幅度增加战斗部装药,进而提高战斗部威力。

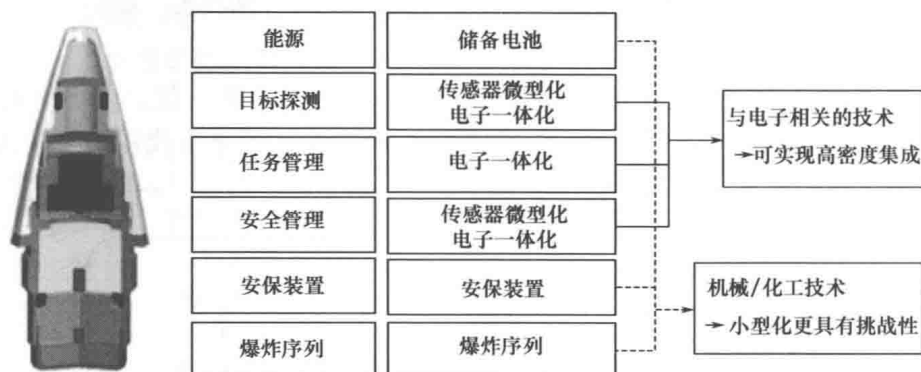


图 8-4 引信技术的发展图

(2) 由于采用 MEMS 技术,使得配以爆炸序列的 MEMS 安全系统体积更小,易于实现引信对战斗部的分体式多点起爆控制。多点起爆对于核武器战斗部和常规对空和反舰等定向战斗部极为重要。目前的引信安全系统和爆炸序列都相当复杂,占用空间大,采用 MEMS 技术可实现结构简化,减小空间。

(3) MEMS 引信进一步促进常规弹药的灵巧化和智能化。传统引信的功能主要是对战斗部的起爆控制,现代引信不仅具有起爆控制的功能,还具有对续航发动机点火/战斗部起爆一体化控制的功能和修正弹道功能。如美国的 AIM-120 空空导弹、AIM-54 “不死鸟” 空空导弹、FIM-92 “毒刺” 肩射式地空导弹、“标枪” 反坦克导弹等均采用了引信点火/起爆一体化双重控制模式,从而大幅度提高了引信乃至全弹的安全度。

20 世纪 70 年代末,国外开始研究利用引信对弹体姿态进行简易控制修正,以提高常规弹药的直接命中概率。较多采用在弹体上设置若干微型发动机,通过引信控制不同方位发动机的点火产生一推力矢量对弹道进行修正,而采用 MEMS 引信更易于实现多点多次精确点火控制。

(4) MEMS 引信由于体积小、质量小,可以根据需要安放在弹药所需的任何位置,比传统引信具有更强的空间灵活性和适应性。

(5) MEMS 引信由于采用集成工艺制造,性能一致性和可靠性很高。易于排除手工装配中由于人为失误所造成的不良影响。

(6) MEMS 引信抗高冲击过载性能明显优于传统引信。抗高冲击过载性能对反跑道、反工事侵彻引信尤其重要,因为弹药高速侵彻钢筋混凝土构件时所产生的冲击加速度可达 $10^5 g$ 量级,引信的抗冲击性能显得特别突出。

(7) 对于批量生产, MEMS 引信较传统引信的成本低。图 8-5 为美军在理想单具战斗武器 (OICW) 系统中采用 MEMS 引信技术。

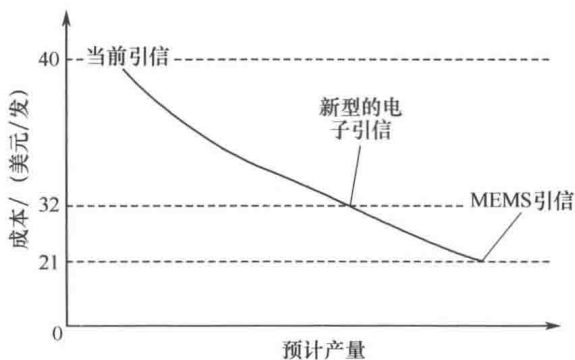


图 8-5 美军在 OICW 系统中采用 MEMS 引信技术

目前，在引信系统中采用 MEMS 技术的条件已经成熟。从上述分析也可以发现 MEMS 技术在引信中应用的优势越来越凸显，MEMS 技术在引信中的应用是现代化引信发展的基础。

8.3 国外 MEMS 引信现状

20 世纪 90 年代中后期，美国和其他北约国家将 MEMS 技术应用在引信系统，相关研究在国外学术论文和专利中都有体现，同时，在代表美国引信技术发展路线的美国引信年会十几年的报告中也有所体现，并且数量逐年增加，应用领域愈加广泛。表 8-1 统计了 2005—2015 年美国引信年会主题，美国引信的关注领域正由传统的机械电子引信逐渐向先进的智能引信转化，近年来美国对未来引信的发展方向同样处于探索阶段，但小型化、智能化与多功能化是未来引信的主要发展方向已经得到认同。

表 8-1 2005—2015 年美国引信年会主题统计

年 份	关注领域
2005	引信安全与可靠性技术
2006	电子引信
2007	引信标准的变革
2008	灵巧引信——智能引信解决方案
2009	下一代引信——冲突中的不对称优势
2010	引信技术进化趋势——更小、更智能与更安全
2011	在智能武器中引信角色的进化
2012	用于新一代武器的新一代引信
2013	停办
2014	面对引信新挑战的协作
2015	极端条件下的引信设计